

Procesado de medidas en el infrarrojo para la evaluación-prueba no destructiva

Daniel A. González⁽¹⁾, Clemente Ibarra Castanedo⁽²⁾, Francisco J. Madruga⁽¹⁾,

Jose M. Lázaro⁽¹⁾, Jose M. López-Higuera⁽¹⁾

daonfer@teisa.unican.es, ibarrac@gel.ulaval.ca, madruga@teisa.unican.es,

lazarojm@unican.es, higuera@teisa.unican.es

⁽¹⁾ Grupo de Ingeniería Fotónica, Dept. TEISA, Universidad de Cantabria, 39005, Santander, Cantabria, España.

⁽²⁾ Computer Vision and Systems Laboratory, Université Laval, G1K7P4 Québec, Canada.

Abstract- The detection and measurement of electromagnetic emissions on the infrared spectrum leads to Non Destructive Evaluation and Testing (NDE&T) of big areas in a fast, safe, contactless and interference-free way. Thermal images of surfaces indicate the presence or void of both superficial and subsuperficial defects. However, to obtain better results than just interpreting directly the captured sequences, an important processing must be done. Infrared signatures, that are generally weak and noisy by nature, are further degraded due to detectors, imperfections, non-uniform heating, surface geometry and detection viewpoint. As a result, processing to correct some of these effects is a mandatory step prior to defect detection and/or characterization. In this article, the different methods involved in common analysis are presented. The fusion of fields, from optics to mechanics through computers is clearly shown.

I. INTRODUCCIÓN

Cuando una superficie es calentada, se generan ondas dispersivas que se atenúan rápidamente en la región contigua a la superficie. Estas ondas, conocidas como ondas térmicas, fueron investigadas por primera vez por el matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) y son de gran importancia para la explicación de los fenómenos fototérmicos y fotoacústicos, base de muchas técnicas no destructivas de ensayos.

Cuando la luz es absorbida por un material, se producen efectos tales como la conversión de luz a calor, producción de gases (fotosíntesis), etc. Este tipo de fenómenos se formulan de acuerdo con la teoría fototérmica, donde una onda de luz modulada se convierte en calor mediante procesos no radiactivos dentro del sólido y esto hace que se generen ondas térmicas apenas por debajo de la interfase de la muestra. Las ondas térmicas se propagan entonces hacia el interior del material atenuándose fuertemente pero actuando como cualquier otra onda, esto es, sufren reflexión ante cualquier interfaz subsuperficial como podría ser un defecto o un cambio de material. Las ondas reflejadas retornan hacia la superficie produciendo un comportamiento oscilante de su temperatura. Ante el control o medida de la temperatura superficial de un material durante todo el proceso, seremos capaces de relacionar las variaciones detectadas con lo que esté ocurriendo dentro del espécimen. El modelado del fenómeno de la conducción del calor cobra entonces una gran relevancia.

Muchos autores han contribuido a un número elevado de técnicas y algoritmos que modelan el proceso de transferencia de calor a través de la conducción ante varios tipos de excitación. Desde las aproximaciones más básicas

unidimensionales (1D) hasta los más complejos modelados tridimensionales (3D), el proceso ha sido siempre condicionado a un conocimiento a priori del espécimen. Las dimensiones del cuerpo (poder suponer semi-infinitud en alguna de sus dimensiones), los coeficientes térmicos (conductividad térmica, densidad, calor específico, difusividad térmica, longitud de onda térmica,...), y una aproximación de la estructura interior del material (si es un medio multicapa, su composición); todo conocimiento a priori es útil para un mejor (o más simplificado) modelado de las ecuaciones de conducción del calor.

Teniendo bajo control el modelado del proceso de conducción del calor tras una determinada excitación superficial, la temperatura que se observe en la superficie estará íntimamente relacionada con lo que ocurre en el interior del material y, a su vez y de forma inversa, conocida la temperatura en la superficie podremos interpretar lo que puede pasar en el interior. En condiciones de homogeneidad tanto del material como de la excitación térmica producida, la temperatura superficial debe ser igual en toda la superficie y cualquier variación es interpretada como una alteración de las condiciones de conducción de la onda térmica hacia el interior del material, condiciones que a partir del modelado podremos catalogar.

En este punto, dado que el uso de la termografía infrarroja como sistema de detección nos permite el mapeado remoto (sin contacto) y preciso de la temperatura de una superficie, se pueden detectar y evaluar defectos, imperfecciones y cambios de composición en el interior de materiales de una forma rápida, fiable y segura. La cámara o sistema de detección infrarroja detectará únicamente la radiación emitida por la superficie pero, en aplicación de lo anteriormente comentado, la radiación portará información del comportamiento térmico interno.

En este artículo se pretende revelar el procesado necesario para poder hacer de la Termografía una técnica efectiva de evaluación y ensayo. Primeramente se muestran las técnicas que son necesarias emplear para que aquellos datos capturados por el sistema termográfico se correspondan de la manera más precisa con los valores de temperatura que representen. A continuación, el conocimiento a priori del material y el modelado del proceso de transferencia de calor que sufre el espécimen eliminan “ruidos” en las imágenes y datos poco útiles para el proceso de inspección. Finalmente, otros algoritmos y procesados ayudan a identificar, caracterizar y clasificar los puntos de mayor interés.

II. PREPROCESADO

El principio de detección de defectos se basa en el hecho de que el frente térmico se propaga homogéneamente a través del material salvo en presencia de inhomogeneidades o defectos. Si hubiera algo en el interior del material que tuviera diferentes propiedades térmicas, la conducción del calor sufriría variaciones y esto se reflejaría en la superficie de la muestra mediante la aparición de puntos de contraste térmico y que pueden ser detectados con la ayuda de una cámara infrarroja. Por lo tanto, la precisión en la medida de temperaturas debe estar garantizada y es por ello que existe un preprocesado con el que se pretenden minimizar los efectos de la óptica que captura los valores de esa temperatura superficial [1]. Éste cubre diversas etapas que se presentan a continuación.

La primera etapa de preprocesado consiste en adecuar y regenerar los píxeles defectuosos (*badpixels* o píxeles muertos) [1], esto es, píxeles que presentan niveles anormales de intensidad. Afortunadamente, éstos pueden ser detectados fácilmente para después ser remplazados por el valor promedio de su vecindad.

El siguiente paso es la corrección del patrón de ruido fijo (FPN-*Fixed Pattern Noise*) [1] causado por diferencias en la responsividad de los detectores. Para los casos en que la escena es fija, este problema puede corregirse con la sustracción de una imagen ‘fría’, esto es, el termograma grabado antes de la aplicación del impulso de calor en la superficie.

El encuadre (*vignetting*) consiste en un oscurecimiento de las esquinas de los termogramas respecto al centro de los mismos debido a una exposición limitada en esas áreas. El procedimiento de corrección de encuadre requiere una etapa de calibración que involucra la toma de termogramas de cuerpo negro a diferentes temperaturas (en el rango de operación) [1].

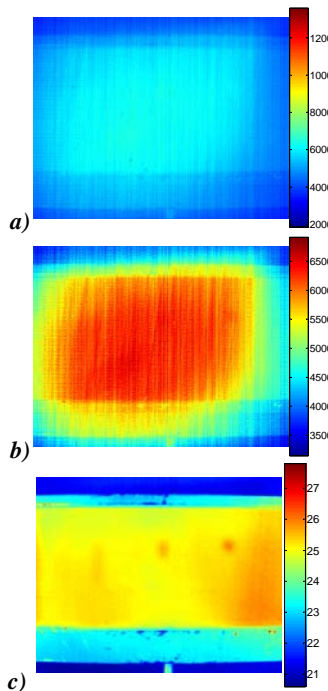


Fig. 1. Termogramas a $t=348$ ms: (a) no corregido; (b) tras restauración de píxeles defectuosos; (c) corrección de encuadre y del FPN.

Finalmente, los datos obtenidos por la cámara y que recogen valores de intensidad de la radiación infrarroja han

de ser transformados en valores de temperatura. Para ello, una calibración en temperatura es requerida. El resultado es un polinomio de 3^{er} o 4^a grado obtenido por regresión de los datos de temperatura con respecto a los niveles de gris dados por la cámara. En la Fig. 1 se encuentra una muestra del preprocesado que se realiza tras la captura de una secuencia termográfica.

III. PROCESADO

Una vez que la señal infrarroja ha sido preprocesada y transformada en temperatura, es posible realizar ahora un tratamiento de imágenes bien sea para fines de detección de defectos internos o bien para su caracterización (determinación de propiedades térmicas, tamaño y profundidad). Este procesado puede ser tan sencillo como realizar el contraste absoluto [1] de los valores temporales de temperatura entre dos zonas, asegurando que una de ellas sea libre de defectos (*soundarea*). Sin embargo, la identificación de esta zona puede ser una tarea poco factible además de que podría resultar inadecuada según la zona seleccionada. Por ejemplo, la Fig. 2 recoge una selección de termogramas recogidos por una cámara infrarroja (Santa Barbara focal plane infrared camera, model SBF125) tras una estimulación de 15msg de una placa de PlexiglasTM de 4 mm de espesor y dimensiones de 15x15 cm la cual contiene 6 taladros circulares de 10 mm de diámetro en su parte posterior a diferentes profundidades (1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 mm). En ella se puede observar la no uniformidad del calentamiento superficial e interpretar cómo el escoger una *soundarea* u otra puede arrojar diferentes valores de contraste. Por tanto, sería interesante evitar la identificación de la *soundarea* mediante procesado. Esto se consigue con el conocimiento a priori de la transferencia del calor en el material y de la excitación que se realice.

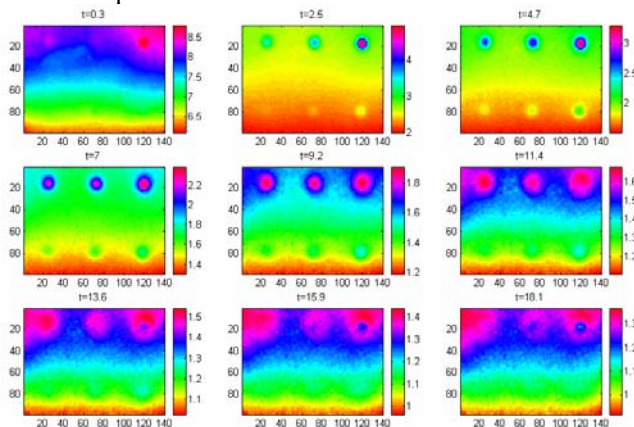


Fig. 2. Termogramas capturados donde se observa la dificultad de encontrar una buena zona libre de defectos por efecto de la no uniformidad del calentamiento superficial del espécimen.

A la hora de establecer la excitación externa necesaria para generar un frente térmico en el material bajo inspección usando el efecto fototérmico, se puede liberar o transferir la misma energía de forma pulsada (de mayor o menor temporalidad) o de forma modulada. Esto da lugar, en el caso de la termografía activa, a la termografía pulsada (*pulsed thermography*), la termografía de largo pulso (*long-pulse or step-heating thermography*) y la termografía de lazo cerrado (*lock-in thermography*) [2]. Considerando el caso de estudio de la transferencia de calor en un sólido semi-infinito, las

ecuaciones del modelado de la evolución de la temperatura se simplifican. La solución para una onda térmica propagándose a través de un material homogéneo y semi-infinito puede expresarse entonces como [3]:

$$T_{lock-in}(z,t) = T_0 \exp\left(\frac{-z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - wt\right) \quad (1)$$

$$T_{pulsada}(z,t) = T_0 + \frac{Q}{\sqrt{k\rho c_p \pi t}} \exp\left(\frac{-z^2}{4\alpha t}\right) \quad (2)$$

$$T(t) = F(t) - \delta(t)F(t - \tau) \quad (3)$$

$$F(t) = \frac{2Q}{k} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}$$

donde T_0 en °K es el gradiente de temperatura inicial inducido por la fuente de calor, w [rad/sg] es la frecuencia de modulación, λ [m] es la longitud de onda, μ [m] la longitud de difusión térmica, Q [J/m²] es la energía absorbida por la superficie, k [W/m°K] la conductividad térmica, ρ [kg/m³] la densidad del material, c_p [J/kg°K] el calor específico, $\alpha = k/\rho c_p$ [m²/sg] es la difusividad térmica y donde $F(t)$ corresponde a la respuesta térmica debida a una excitación continua plana de la superficie.

Estas tres formas de excitación son las más comúnmente utilizadas para la evaluación y prueba no destructivas. Cada una de ellas representa una condición de contorno diferente en los problemas de ecuaciones diferenciales propias del desarrollo de los modelos de transferencia de calor en sólidos. Los resultados de la simulación se presentan en la Fig. 3 donde se aprecian los incrementos de temperatura superficiales que se obtienen con la excitación producida por la misma energía para un pulso corto (eje vertical de la izquierda) o un pulso largo (eje vertical de la derecha) [4]. Además en ella es fácil distinguir el comportamiento térmico de las zonas defectuosas de las no defectuosas. Modelado el comportamiento de las zonas *soundarea*, se podría adecuar un procesamiento con el que a cada píxel se le restara la evolución temporal de su comportamiento si fuera un píxel libre de defectos, idealmente. Realmente se estaría efectuando el contraste absoluto [1] de forma automática y sin necesidad de la selección de la *soundarea*.

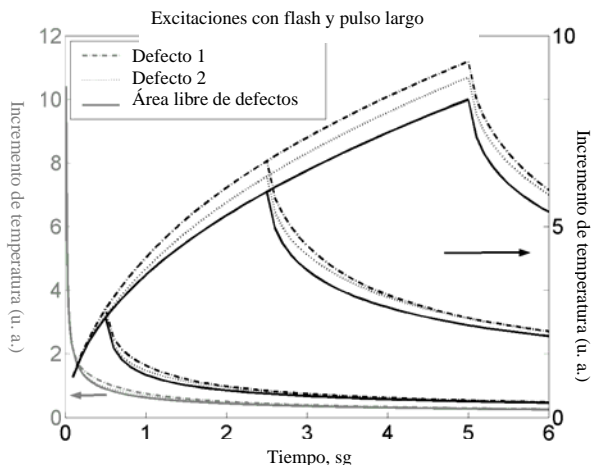


Fig. 3. Modelado de la aparición de defectos en un espécimen siendo éste excitado por un frente térmico generado por la aplicación de un pulso de luz corto (flash, a la izquierda) o pulsos largos de 0.5, 2.5 y 5 sg.

Algunos de los algoritmos que realizan esta tarea se encuentran en la literatura y se fundamentan, por lo general, en transformadas de las secuencias temporales. Fourier [5-7], Laplace [8], Hough [9], Radon [10], y métodos de contraste diferencial [11-12] posibilitan la eliminación de la selección del *soundarea* y los efectos de las no uniformidades (en el calentamiento u orientación de los equipos de excitación con el espécimen) dando como resultado imágenes que muestran únicamente las zonas defectuosas.

IV. ANÁLISIS

Dentro de lo que se puede entender como análisis, se establecen todos aquellos procesados y tratamientos que permiten la extracción de información de las inspecciones realizadas. El objetivo es poder detectar la presencia de los defectos y caracterizarlos en la medida de lo posible con sus tamaños y profundidades.

La inspección visual por parte de un operador es la forma más comúnmente adoptada para la detección de defectos. Diferentes organizaciones alrededor del mundo otorgan certificaciones de personal (inspector termográfico nivel I, II y III) [2]. Sin embargo, se está trabajando en la obtención de métodos automatizados que pueden ayudar a reducir la subjetividad e incluso eliminar por completo la intervención humana en el proceso de detección [5-13]. Estos, obviamente, conllevan una importante carga de algoritmia y técnicas de procesamiento muy variadas.

Una vez detectados los defectos, es igualmente posible estimar la forma y el tamaño de los mismos tras la aplicación de un algoritmo de extracción de bordes o segmentación, p.ej. Sobel, Roberts, Canny, etc. También se puede realizar con un simple análisis de perfiles en las imágenes como puede verse en la Fig. 4.

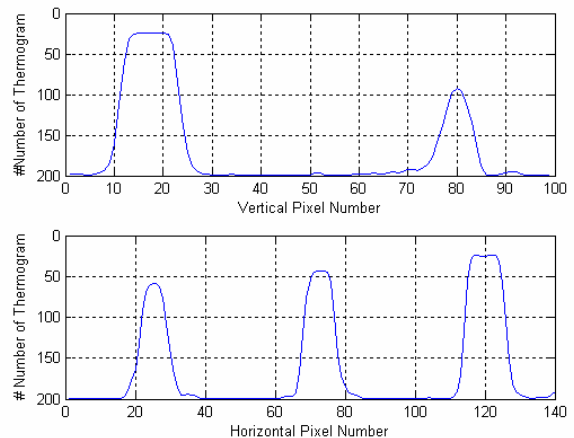


Fig. 4. Perfiles, vertical y horizontal, de ejemplo obtenidos de las imágenes resultantes de aplicar diferentes técnicas de procesamiento. En este caso se corresponde con el método DAC aplicado a los mismos termogramas de la Fig. 2

Finalmente, mediante el uso de métodos de inversión de la profundidad, se puede establecer la profundidad de los defectos haciendo uso tanto de los datos en el dominio temporal como en el frecuencial, si aplicamos la Transformada de Fourier discreta (TFD). Por ejemplo, en el dominio del tiempo, la mayoría de estas técnicas requieren de una etapa de calibración a partir de la cual, los datos experimentales pueden ser sometidos a un proceso de regresión con una relación empírica de la forma [8]:

$$z = A \cdot t_{\max}^{1/2} \cdot C_{\max}^h \quad (4)$$

donde C sería el valor del contraste térmico y los parámetros A y h se determinan por regresión.

En el dominio frecuencial, los métodos de inversión tanto en *lock-in thermography* [13] como en *pulsed phase thermography* [14], se basan en una relación directa entre la profundidad z, y la difusividad térmica μ , evaluada a la frecuencia límite f_b [8]:

$$z = C_1 \cdot \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot f_b}} \quad (5)$$

donde la constante de regresión C_1 toma un valor igual a la unidad cuando se trabaja con imágenes de amplitud, y un valor de aproximadamente 1.8 en el caso de la fase.

V. CONCLUSIONES

La Termografía Infrarroja es una herramienta de gran utilidad para la Evaluación No Destructiva de materiales y sistemas. Los avances de los últimos años en procesamiento de imágenes, han contribuido a aumentar el interés en la misma. En general, una secuencia de termogramas requiere de una etapa de preprocesado (para corregir los píxeles muertos, el encuadre y el FPN, y una transformación en temperatura), procesado para el modelado de la transferencia de calor en el cuerpo y técnicas de tratamiento de imagen para el análisis de los resultados. En esta comunicación se han presentado las guías de todo este procesado en un intento de dar a conocer la Termografía Infrarroja a la comunidad científica especializada en el procesamiento de señales y en el análisis de imágenes en un claro ejemplo de fusión de campos de investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados en esta comunicación fueron en parte financiados por el Ministerio Español de Educación y Ciencia través del Proyecto SiRAS TEC2004-05936-C02-02.

REFERENCIAS

- [1] Maldague X. P. "Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing," John Wiley & Sons, N. Y., 2001.
- [2] American Society For Nondestructive Testing - ASNT, "Infrared and Thermal Testing", Nondestructive Handbook on Infrared Technology, Volume 3, ASNT Handbook Series, X. Maldague technical ed., P. O. Moore ed., 3rd edition, Columbus, Ohio, ASNT Press, 2001, 718 p.
- [3] Carslaw H. S., Jaeger J. C. "Conduction of Heat in Solids", 2nd edition, Clarendon Press, Oxford, 1986.
- [4] D.P. Almond, P.M. Patel, "Photothermal Science and Techniques", Chapman & Hall, 1ª edición, 241 páginas, 1996.
- [5] Maldague X. P. and Marinetti S. "Pulse Phase Infrared Thermography," J. Appl. Phys., vol. 79, no. 5, 1996, p. 2694-2698.
- [6] Shepard S. M. 2001, "Advances in Pulsed Thermography", Proc. SPIE, Thermosense XXIII, 4360: 511-515.
- [7] Ibarra-Castanedo C., González D., Maldague X., "Infrared Image Processing for Nondestructive Applications", NDE 2004 National Indian Society annual conference, Pune, India, 9-11 Dic. 2004
- [8] Ibarra-Castanedo C. "Quantitative Subsurface Defect Evaluation by Pulsed Phase Thermography: Depth Retrieval with the Phase", Ph. D. thesis, Université Laval, 2005.
- [9] González D.A., Ibarra-Castanedo C., Madruga F.J., Maldague X., "Differentiated Absolute Phase Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequences", Infrared Physics & Technology, 48, pp. 16-21, 2006.

- [10] González D.A., Ibarra-Castanedo C., Madruga F.J., Maldague X., "Analysis of Pulsed Thermographic Sequences based on Radon Transform", ThermoSense XXVIII, abril 2006
- [11] Pilla M., Klein M., Maldague X., Salerno A. "New Absolute Contrast for Pulsed Thermography," Proc.QIRT, Eurotherm Seminar 64, 2002.e.
- [12] González D. A., Ibarra-Castanedo C. Pilla M., Klein M., J. M. López-Higuera and Maldague X. "Automatic Interpolated Differentiated Absolute Contrast Algorithm for the Analysis of Pulsed Thermographic Sequence," Proc. QIRT 7, 2004.
- [13] Meola C. and Carlomagno G. M. "Recent Advances in the Use of Infrared Thermography", Meas. Sci. Technol., vol. 15, 2004, p.27-58.
- [14] Ibarra-Castanedo C. and Maldague X. "Pulsed Phase Thermographic Reviewed," Qirt J., vol. 1, no. 1, 2004, p 47-70.